

Увеличение дальности работы когерентного оптического рефлектометра с помощью волокна с чирпированными волоконными брэгговскими решетками

Д.Р.Харасов, Д.М.Бенгальский, М.Ю.Вяткин, О.Е.Наний, Э.А.Фомиряков,
С.П.Никитин, С.М.Попов, Ю.К.Чаморовский, В.Н.Трещиков

Продемонстрирована рекордная дальность детектирования внешнего воздействия – на расстояние 140 км без использования оптических усилителей в линии – с помощью когерентного рефлектометра внешнего воздействия, использующего участок волокна с записанными чирпированными брэгговскими решетками (ЧВБР). Данное решение обеспечивает одновременную работу когерентного рефлектометра в стандартном одномодовом волокне на расстоянии примерно до 100 км и на участке волокна с ЧВБР, удаленном на расстоянии не менее 140 км от начала линии.

Ключевые слова: распределенный датчик, волоконно-оптический датчик, фазочувствительный оптический рефлектометр, когерентный рефлектометр, волоконные брэгговские решетки, чирпированные волоконные брэгговские решетки.

1. Введение

Когерентные (фазочувствительные) импульсные оптические рефлектометры на основе эффекта рэлеевского рассеяния света в оптическом волокне (Ф-OTDR, фOTDR, COTDR) [1–3] широко применяются в качестве распределенных датчиков для мониторинга и охраны протяженных объектов. Дальность работы Ф-OTDR ограничена затуханием света в волокне и составляет ~50 км.

Существует несколько способов увеличения дальности работы Ф-OTDR. Первый способ – это использование волокон с более низким затуханием. Например, использование ULL-волокна с потерями ~0.16 дБ/км вместо стандартного одномодового волокна (SSMF) с потерями 0.2 дБ/км позволяет увеличить дальность работы Ф-OTDR на 25%. Если на участке с волокном есть доступ к электричеству, дальность работы можно увеличить, установив волоконные эрбиевые усилители (EDFA) [4]. Другой способ – использование волоконных эрбиевых усилителей с удаленной накачкой (ROPA) и/или распределенных усилителей на эффекте ВКР [5, 6]. Так, применение стан-

дартного однокаскадного рамановского усилителя с односторонней накачкой позволяет увеличить дальность работы Ф-OTDR примерно на 30 км [7].

Третий способ увеличения дальности работы Ф-OTDR основан на использовании соединения волокон с последовательно увеличивающимися коэффициентами рэлеевского рассеяния. Например, в работе [8] использовались три последовательно соединенных волокна: SSMF, волокно со смещенной ненулевой дисперсией (NZDSF) и волокно для компенсации дисперсии (DCF). Их совместное применение позволило увеличить дальность работы когерентного рефлектометра с 29 до 43 км. Поскольку рэлеевское рассеяние является основным механизмом затухания света в волокне, то в волокнах с более высоким коэффициентом рэлеевского рассеяния, как правило, больше и затухание.

Для увеличения мощности регистрируемого сигнала (рефлектограммы) также можно использовать волокно с записанными волоконными брэгговскими решетками (ВБР). Отраженное от ВБР излучение полностью попадет в моду волокна, что выгодно отличает его от рэлеевского рассеяния, при котором лишь малая часть рассеянного излучения попадает в моду. В работе [9] показано, что амплитуда рефлектограммы от участка волокна с ВБР [10, 11] в 150 раз (~22 дБ) превышает рефлектограмму от участка обычного волокна. Однако узкий спектр отражения обычных ВБР затрудняет их практическое применение. В работе [12] предлагается использовать ВБР короткой длины – порядка 50 мкм. Такие ВБР обладают меньшим коэффициентом отражения, но их спектр гораздо шире (~8 нм) по сравнению со спектром длинных ВБР. Другой способ расширения спектра отражения – это использование волокна с записанными чирпированными волоконными брэгговскими решетками (ЧВБР) [13]. Поскольку и короткие решетки, и чирпированные решетки обеспечивают расширение спектра отражения, выбор конкретного решения определяется удобством его реализации с использованием имеющейся технологии изготовления решеток, обеспечивающей заданные параметры устройства. В [14]

Д.Р.Харасов. ООО «Т8 Сенсор», Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатая, 44/1; Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Россия, Московская обл., 141701 Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: kharasov@phystech.edu

Д.М.Бенгальский, О.Е.Наний, Э.А.Фомиряков. ООО «Т8 Сенсор», Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатая, 44/1; Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы

М.Ю.Вяткин, С.М.Попов, Ю.К.Чаморовский. Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Акад. Введенского, 1

С.П.Никитин, В.Н.Трещиков. ООО «Т8 Сенсор», Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатая, 44/1

с помощью линии из комбинации волокна ULL длиной 120 км и волокна с ЧВБР OFS Acoustisens [15] длиной 5 км была продемонстрирована работа когерентного рефлектометра на расстоянии 125 км без использования усилителей в линии. При этом сигнал рефлектометра на участке 90 – 120 км был ниже уровня собственного шума рефлектометра.

Цель настоящей работы – продемонстрировать возможность регистрации с помощью Ф-ОТДР виброакустических воздействий на участки волокна с ЧВБР, расположенные на расстояниях больше 125 км от места расположения прибора вдоль кабельной линии на основе стандартного телекоммуникационного волокна SSMF стандарта G-652.

2. Материалы и методы

Для увеличения дальности работы датчика виброакустических воздействий нами использовалось сочетание высокочувствительного рефлектометра Ф-ОТДР «Дунай» компании Т8 [16] и опытные образцы волокна с ЧВБР, изготовленные во Фрязинском филиале ИРЭ РАН [17]. Параметры волокна с ЧВБР: средняя линейная плотность решеток – 2 м^{-1} , средняя длина решетки – 1 см. Спектр отражения единичной ЧВБР, измеренный с помощью частот-

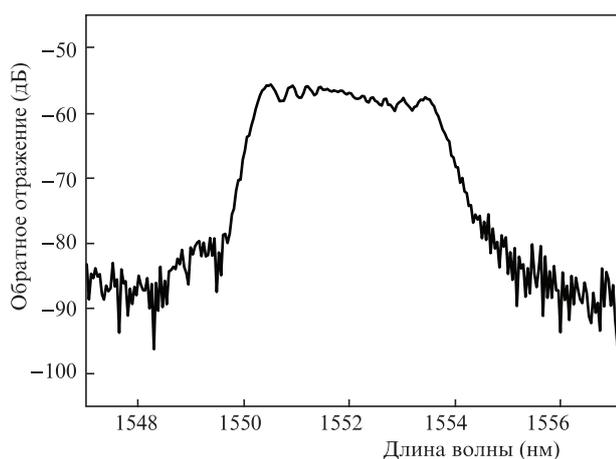


Рис.1. Спектр отражения отдельно взятой ЧВБР, измеренный с помощью OFDR-рефлектометра LUNA OBR 4400.

ного рефлектометра (OFDR) высокого разрешения LUNA OBR 4400, показан на рис.1. Максимум отражения наблюдается на длинах волн 1550.2–1553.5 нм. С помощью некогерентного рефлектометра Anritzu MU90901515C6 были измерены полные потери в местах сварки SSMF и волокна с ЧВБР, которые составили 4.3 дБ.

Схема экспериментальной установки приведена на рис.2. В рефлектометре Ф-ОТДР из непрерывного излучения узкополосного одночастотного лазера с длиной волны 1550.12 нм с помощью акустооптического модулятора (АОМ) формировался зондирующий прямоугольный импульс длительностью $\tau_p = 200 \text{ нс}$ с частотой следования $f_s = 500 \text{ Гц}$, усиленный до уровня 150 мВт с помощью усилителя мощности EDFA. Мощность импульса измерялась с 1%-ного выхода сплавного ответвителя фотодетектором Thorlabs DET01CFC, подключенным к осциллографу Agilent Infinium DSA90804A. К когерентному рефлектометру подключалась линия из трех последовательно соединенных волокон: SSMF-волокна длиной 140 км, волокна с ЧВБР длиной 300 м и SSMF-волокна длиной 30 км. Среднее затухание в линии $\alpha = 0.185 \text{ дБ/км}$. Вся линия находилась на виброизолированном оптическом столе, а катушки с волокнами – в звукоизолирующих коробках из поролона. Обратный рассеянный сигнал через циркулятор попадал на вход оптического предусилителя EDFA, где дополнительно усиливался. Усиленный сигнал регистрировался с помощью фотоприемного устройства (ФПУ), а затем дискретизировался посредством аналого-цифрового преобразователя (АЦП). С использованием программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) данные с АЦП поступали на компьютер, где и происходила их обработка.

Временная зависимость фототока ФПУ прямо пропорциональна зависимости оптической мощности обратного рассеянного сигнала от времени запаздывания τ_d относительно момента ввода в волокно зондирующего импульса, которое однозначно связано с расстоянием вдоль волокна: $z = v_g \tau_d / 2$, где v_g – групповая скорость в волокне. Максимальная длина линии, ограниченная используемой частотой зондирования $f_s = 500 \text{ Гц}$, $z_{\text{max}} = v_g / (2f_s) = 200 \text{ км}$. Также измерялись рефлектограммы при внешнем акустическом воздействии от динамика, подключенного к генератору синусоидального сигнала с частотой 502 Гц.

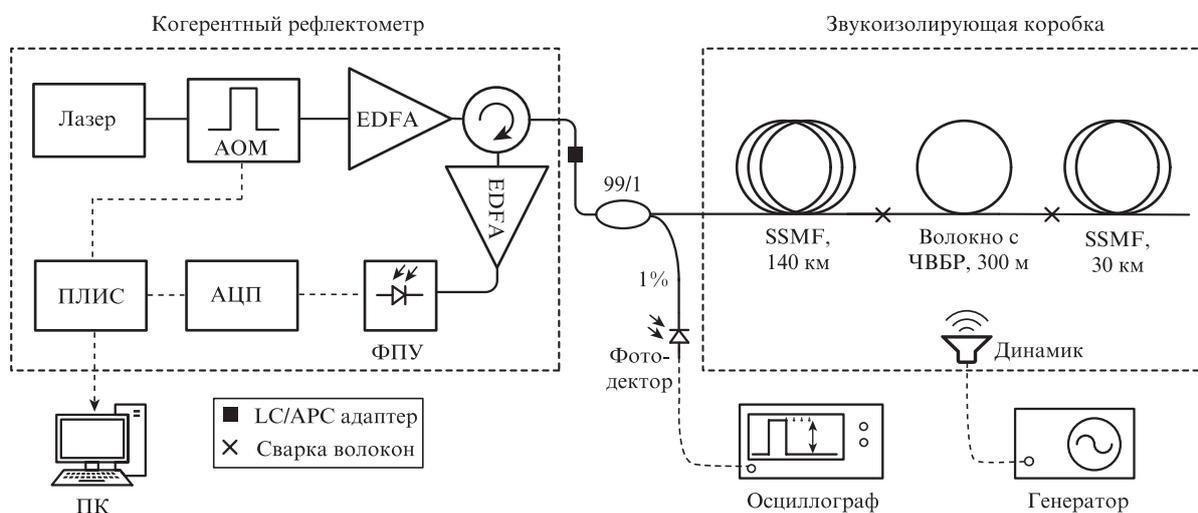


Рис.2. Схема экспериментальной установки с линией длиной 170 км. Волокно с ЧВБР длиной 300 м установлено на расстоянии 140 км.

3. Результаты экспериментов

На рис.3 в логарифмическом масштабе показана рефлектограмма – зависимость оптической мощности рассеянного излучения от расстояния вдоль волокна z . Рефлектограмма имеет вид сильно изрезанной кривой. Собственный шум рефлектометра находится на уровне -46.7 дБ. Средний уровень рефлектограммы уменьшается с расстоянием из-за затухания зондирующего импульса при его распространении в прямом направлении и затухания рассеянного назад излучения в обратном направлении. Для оценки среднего уровня мощности рассеянного излучения на рисунке показано скользящее среднее рефлектограммы в окне 200 м. Приведена также линейная аппроксимация на логарифмической шкале среднего уровня мощности от расстояния вдоль волокна. Наклон полученной зависимости, как и ожидалось, с высокой точностью совпадает с удвоенным погонным средним затуханием в волокне 2α . На первых 50 км линии минимумы и максимумы рефлектограммы находятся выше уровня шума и хорошо видны на ней.

Начиная примерно с 50-го километра, минимумы рефлектограммы оказываются ниже уровня ее собственных шумов и поэтому неразличимы. Средний же уровень рефлектограммы совпадает в пределах изрезанности с линейной аппроксимацией уровня мощности примерно до 82 км. На расстояниях более 82 км экспериментальные измерения среднего уровня рефлектограммы некорректны, т. к. ее большая часть находится ниже уровня собственных шумов. Согласно линейной аппроксимации средний уровень рефлектограммы выходит на уровень собственных шумов в районе 106 км. На участке с волокном ЧВБР (140 км) рефлектограмма заметно выше уровня шума: скользящее среднее превышает уровень шума примерно на 4 дБ и совпадает с теоретическим уровнем рефлектограммы, соот-

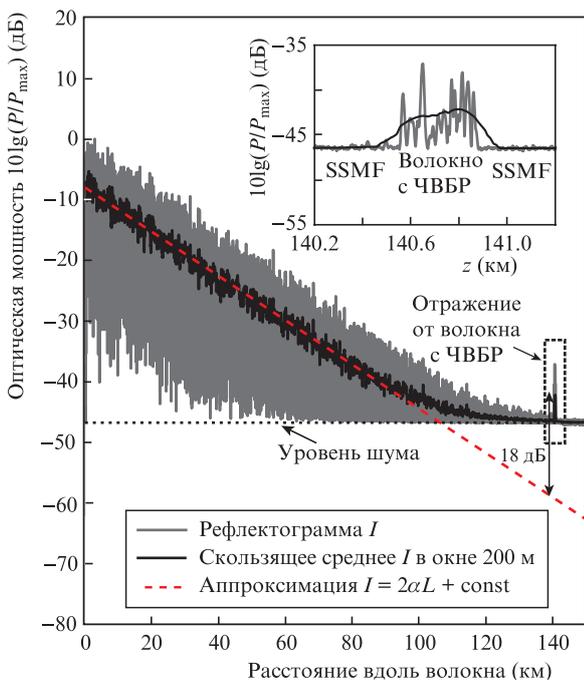


Рис.3. Рефлектограмма в логарифмическом масштабе (черная линия соответствует скользящему среднему рефлектограммы в окне 200 м, штриховая – аппроксимации среднего уровня). На вставке – рефлектограмма с участка волоконной линии 140.2–141.2 км.

ветствующим 90.5 км. Скользящее среднее рефлектограммы от участка с волокном ЧВБР на 18 дБ больше теоретического среднего уровня рефлектограммы в волокне SSMF на таком же расстоянии (140 км).

На рис.4 приведена зависимость рефлектограммы от времени («водопад») на участке волокна 140.2 – 141.2 км при внешнем акустическом воздействии. Видно, что на участке волокна с ЧВБР есть отклик рефлектометра на внешнее воздействие. В общем случае отклик сигнала рефлектометра нелинеен по отношению к внешнему воздействию. На рис.5 показан сигнал рефлектометра с участка 140.77 км, на котором наблюдается линейный отклик на внешнее воздействие. Дополнительно сигнал рефлектометра обрабатывался с помощью цифрового фильтра Баттерворта 5-го порядка с нижней и верхней частотами пропускания 1 и 75 Гц соответственно. Сигнал рефлектометра с участка 140.77 км представляет собой зашумленную синусоидальную кривую с частотой 2 Гц и амплитудой ± 0.35 . Частота 2 Гц обусловлена переносом частоты акустического сигнала при частоте зондирования $f_s = 500$ Гц. Среднеквадратичное отклонение данных от кривой аппроксимации составляет 0.22. На рис.6 показан полученный с помощью дискретного преобразования фурье-спектр мощности шума, нормированный на мощность сигнала и полосу 1 Гц. Видно, что уровень шума в полосе 1 Гц ниже уровня сигнала на 11 дБ и более.

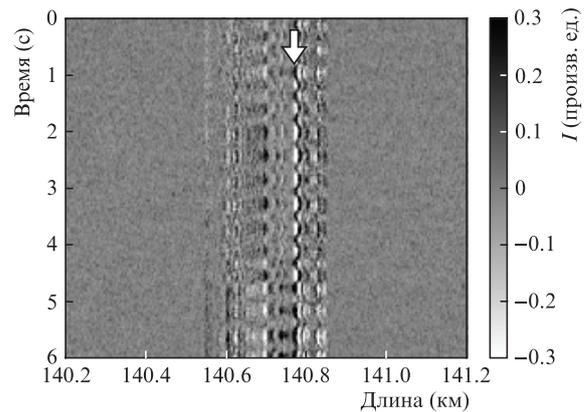


Рис.4. Зависимость сигнала рефлектометра от времени («водопад») на участке волоконной линии 140.2–141.2 км. Стрелкой отмечен участок волокна с ЧВБР на расстоянии 140.77 км, где наблюдается линейный отклик на внешнее воздействие.

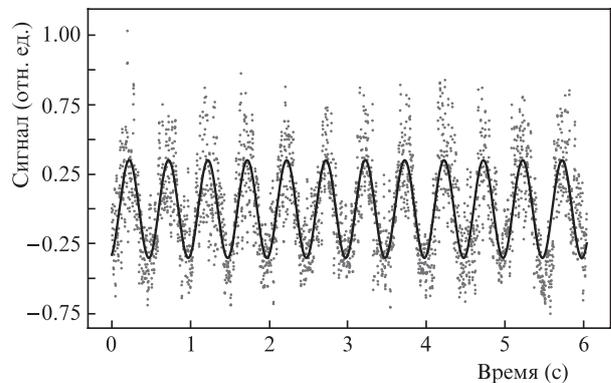


Рис.5. Временная зависимость сигнала рефлектометра после фильтрации в точке волокна с ЧВБР на расстоянии 140.77 км, в которой наблюдается линейный отклик на внешнее воздействие (сплошная кривая – аппроксимация функцией $0.35 \sin(2\pi \cdot 2t)$).

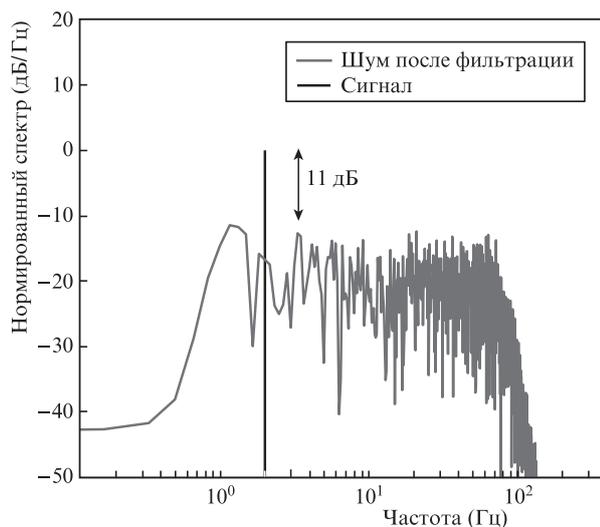


Рис.6. Спектр, нормированный на мощность сигнала и полосу 1 Гц, в точке волокна с ЧВБР на расстоянии 140.77 км, в которой наблюдается линейный отклик на внешнее воздействие.

Итак, в работе продемонстрирована рекордная дальность детектирования когерентным рефлектометром воздействия на участок волокна, удаленный от начала линии на 140 км, без использования оптических усилителей в линии. Перекрываемое рефлектометром затухание, равное произведению дальности детектирования на погонное затухание, составило 25.9 дБ. При использовании волокна типа ULL с потерями ~ 0.16 дБ/км дальность работы рефлектометра составит ~ 162 км.

Исследованный образец волокна с ЧВБР изготовлен Фрязинским филиалом ИРЭ РАН в рамках государственного задания.

1. Shatalin S.V., Treschikov V.N., Rogers A. *J. Appl. Opt.*, **37** (24), 5600 (1998).
2. Hartog A.H. *Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors* (CRC press, 2017).
3. Alekseev A.E., Vdovenko V.S., Gorshkov B.G., Potapov V.T., Simikin D.E. *Laser Phys.*, **24** (11), 115106 (2014).
4. Tian X. et al. *Opt. Commun.*, **10158**, 101580P (2016).
5. Wang Z.N., Fan M.Q., Zhang L., Wu H., Li Y., Qian X.Y., Rao Y.J., Churkin D.V. *Opt. Express*, **23** (12), 15514 (2015).
6. Martins H.F. Martín-López S., Corredera P., Filograno M.L., Frazão O., Gonzalez-Herráz M. *J. Lightwave Technol.*, **32** (8), 1510 (2014).
7. Kharasov D.R. et al. *Proc. ICLO* (St. Petersburg, 2018, p. 285).
8. Нестеров Е.Т., Трещиков В.Н., Озеров А.Ж., Слепцов М.А., Камынин В.А., Наний О.Е., Сусьян А.А. *Письма в ЖТФ*, **37** (9), 55 (2011).
9. Улановский Ф.И., Кузьменков А.И., Наний О.Е., Никитин С.П., Трещиков В.Н. *Фотон-экспресс*, **6** (134), 189 (2015).
10. Popov S.M. et al. *Proc. PIERS* (St. Peterburg, 2018, pp 1568–1573).
11. Зайцев И.А., Бутов О.В., Волошин В.В., и др. *Радиотехника и электроника*, **61** (6), 602 (2016).
12. Wang X. et al. *IEEE Photon. J.*, **7** (1), 1 (2015).
13. Westbrook P.S. et al. *Proc. OFS* (Jeji, 2018, pp 1–5).
14. Cedilnik G. et al. *IEEE Sensors Lett.*, **3** (3), 1 (2019).
15. Handerek V.A. et al. *Proc. Optical Fiber Sensors* (Lausanne, 2018, p. TuC5).
16. Nikitin S.P. Kuzmenkov A.I. Gorbulyenko V.V. Nanii O.E. Treshchikov V.N. *Laser Phys.*, **28** (8), 085107 (2018).
17. Попов С.М. Бутов О.В., Колосовский А.О., и др. *Квантовая электроника*, **49** (12), 1127 (2019) [*Quantum Electron.*, **49** (12), 1127 (2019)].